

# 論文 3D プリンティングで製作した短繊維補強モルタル積層体の耐久性に関する検討

張 文博\*1・臼井 達哉\*1・田中 俊成\*1・木ノ村 幸士\*1

**要旨:** 著者らは 3D プリンティング技術の開発と実用化を進めている。本報では、短繊維補強モルタルを用いた積層体の耐久性を把握するため、室内促進試験および屋外暴露試験を行った。室内促進試験では、積層体から採取した供試体の促進中性化と塩水浸漬試験を行った。屋外暴露試験には、積層で外周を構築した橋脚、および積層したパネルを貼り付けて製作した梁の 2 種類の部材を用いた。暴露前後において橋脚と梁の中性化深さと表層透気試験を行い、さらに橋脚の細孔構造を分析した。その結果、積層体の中性化および塩分浸透抵抗性は、型枠で製作した試験体と同等以上であり、暴露 1 年後には細孔構造が緻密化する傾向が見られた。

**キーワード:** 3D プリンティング, 短繊維補強モルタル, 中性化, 塩分浸透, 表層透気試験, 細孔径

## 1. はじめに

押出方式の 3D プリンティング (以下、3DP) 技術は、セメント系材料をノズルから押出して立体形状を積層する技術であり、従来技術に比べて生産性・安全性の向上やコストの削減などが期待できるため、建設業界において注目が集まっている<sup>1,2)</sup>。

著者らは、これまでに 3DP 施工システムならびに積層材料を開発し、PC デモ橋桁の実証プロジェクト<sup>3)</sup>を行うことで、大型構造物への展開の可能性を具体的に示した。さらに、この橋桁を支える橋脚の外殻を、短繊維補強モルタルを用いた 3D プリンティングにより構築し、地組みしたユニット鉄筋を建て込んだ後内部コンクリートを打込んで製作した。その交番載荷試験の結果<sup>4)</sup>、積層した外殻によるせん断補強効果やかぶりコンクリートの拘束効果が発揮され、構造性能が向上することを確認した。このような埋設型枠としての使用は、従来の型枠工が不要となること、さらに形状の自由度が高い型枠を簡単に製作できることから、建築物や構造物への適用事例が国内外で多く報告されている<sup>1,2)</sup>。

しかしながら、従来のコンクリート打ち込み施工では締固めにより密度を高めることができるが、押出方式の 3DP 技術では、締固めができないうえに積層後に速硬性が要求される。この場合、積層体自身の一体性が疑問視され、特に次の層までの積層時間間隔が長くなると層間にて脆弱面が形成しやすく、力学性能や耐久性の低下が

懸念される。これに対して、これまで層間の力学特性に着目した研究は数多く存在するが<sup>5)</sup>、耐久性に関する報告は多いとは言えない。そこで本稿では、短繊維補強モルタルを用いた 3DP 積層体の耐久性を検討する目的で、積層ブロックを用いた室内促進試験、および埋設型枠として用いた場合の屋外暴露試験を行った。

## 2. 試験概要

### 2.1 配合および試験項目

試験配合を表-1 に示す<sup>6)</sup>。標準配合は水粉体比 (W/P) が 31%、繊維の外添加体積混入率が 2.5% である。また、夏期のプリンティング施工用に、標準配合から単位水量と凝結遅延剤の量を増やし、微粉末の量を下げた夏期配合も作製した。

実際の積層製作において材料の練上り直後の 0 打フローは 110±10mm、15 打フローは 170±10mm (JIS R 5201) であった。また、鋼製型枠で突き固め作製した φ100×h200mm と 100×100×400mm の試験体を温度 20℃湿度 99%RH の高湿室で 3 日間養生し、さらに温度 20℃湿度 70%RH の恒温恒湿室で養生した後に力学特性試験を行った。その結果、材齢 7 日の圧縮強度と曲げ強度はそれぞれ 54.4N/mm<sup>2</sup> と 11.6N/mm<sup>2</sup> であった。

実施した試験項目を表-2 に示す。室内促進試験では、積層ブロックから採取した試験体の促進中性化と塩水浸漬試験を行った。また、埋設型枠として用いた試験には、

表-1 3D プリンティングに用いた短繊維補強モルタル配合

配合名称	W/P (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					外割添加量(P×%)			繊維混入率 (vol%)
		W	P	S1	S2	V	SP	De	Re	
標準配合	31	310	1000	600	350	20	0.20	0.20	1.00	2.5
夏期配合	31	322	1038	623	259	21	0.20	0.20	1.50	2.5

P: 速硬性セメント (密度 3.08g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 3970cm<sup>2</sup>/g), S1: 砕砂 (密度 2.71g/cm<sup>3</sup>, 最大粒形 2mm, 粗粒率 2.86), S2: 微粉末 (密度 2.71g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 8160cm<sup>2</sup>/g, 45μ 残分 4.0%), V: 分離低減剤 (密度 1.32g/cm<sup>3</sup>), SP: 高性能減水剤, De: 消泡剤, Re: 凝結遅延剤, 短繊維: ビニロン繊維 (呼び長さ 15mm, 呼び径 0.3mm, 密度 1.3g/cm<sup>3</sup>)

\*1 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室 博(工) (正会員)

積層しながら外周を構築した橋脚<sup>5)</sup>、および積層したパネルを貼り付けて製作した梁<sup>7)</sup>の2種類の部材を用いた。これらの部材を実環境下にて1年間暴露し、暴露前後において中性化深さと表層透気試験を行い、さらに橋脚の異なる位置で採取した試料の細孔構造を分析した。

## 2.2 試験体の作製方法

事前に作成した3次元モデルをツールパスデータに変換し、積層プログラムで制御して自動造形を行った。積層幅 25mm、積層厚 10mm、ノズル移動速度 60mm/秒と設定した。また、実用化の状況を想定し、すべてのプリント作業は、温湿度をコントロールしない環境で行った。なお、下記促進中性化試験用の積層ブロックには夏期配合を用いて、塩化物イオン浸透試験用積層ブロック、橋脚と梁の埋設型枠には標準配合を用いて製作した。

### (1) 積層ブロック

室内促進試験では、**図-1**に示すように積層方向を揃えた積層ブロックを製作し、促進中性化と塩分浸透試験に用いた。また、積層体の物質移行の異方性を把握するため、積層ブロックの上面と側面をそれぞれ評価対象とした。製作したブロックの詳細を**表-3**に示す。

促進中性化試験では、材齢 24 時間で列境に沿って試験体を切出し、それぞれに上下面および左右面で促進試験を実施した。また、促進試験用試験体はすべて L640×W100×H100mm とした。長さを 640mm にしたのは、JISA1153 の試験方法を参考にし、同一試験体における中性化を各試験材齢で割裂して確認するためである。

塩化物イオン浸透試験では、**表-3**に示す寸法の積層ブロックを製作し、材齢 24 時間で湿式法によって上面および側面にて φ100×h200mm のコアを採取した。

### (2) 橋脚

橋脚は、**図-2**に示すように積層しながら外周の埋設型枠を2列構築した。積層は2ロットに分けて実施し、積層の時間間隔は2時間で、打継処理は行わなかった。橋脚の外殻が硬化した後、ユニット鉄筋を建て込み、内部に高流動コンクリート (W/C60%, 目標圧縮強度 30N/mm<sup>2</sup>) を打込んで施工した。

### (3) 梁

著者ら<sup>8)</sup>の過去の研究において、層ごとに積層方向を

表-2 本研究で実施した試験項目

試験方法	試験対象	試験内容
室内促進	積層ブロック	促進中性化, 塩分浸漬
屋外暴露	橋脚, 梁	中性化, 表層透気性 (トレント), 細孔径分布 (橋脚のみ)

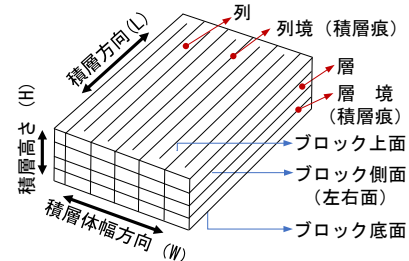


図-1 室内促進試験に用いた積層ブロックの諸元

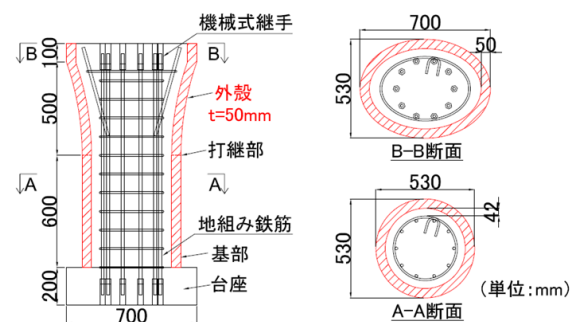


図-2 橋脚の製作概要

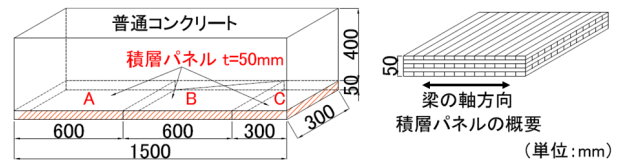


図-3 梁の製作概要

交互に直交させて作製した積層体は、突き固め作製試験体と同等な曲げ強度を有することを確認している。本研究では、その結果を踏まえ、同様な積層方法で**図-3**に示す厚さ 50mm のパネルを製作した。硬化後の積層パネルについて、**図-3**に示す梁の設計寸法に合わせて幅 300mm、長さ 300mm と 600mm の2種類のパネルに切断し、積層時の底面を埋設型枠の底面として木枠内に設置し、内部に普通コンクリート (W/C55%, 呼び強度

表-3 室内促進試験に用いた供試体の作製詳細および試験材齢

試験内容	試験項目	使用配合	積層ブロック寸法 (mm)	促進試験用供試体の詳細			試験材齢 (週)	
				作製方法	寸法 (mm)	試験数		
促進中性化 (JISA1153 :2012)	上下面促進	夏期配合	L640×W375×H100	列境に沿って4列分を切出し →試験面以外の面をシール	L640×W100×H100	3	1, 4, 13, 26	
	左右面促進		L640×W375×H100		L640×W100×H100	3		
	—		—		鋼製型枠突き固め	100×100×400		3
塩化物イオン浸透 (JSCE-G 572-2018) (JSCE-G 574-2013)	上面浸漬	標準配合	L640×W375×H200	積層体ブロック上面からコア採取	φ100×200	1	27,52	
	側面浸漬		L640×W200×H350		積層体ブロック側面からコア採取	φ100×200		1
	—		—		鋼製型枠突き固め	φ100×200		1

27N/mm<sup>2</sup>) を打込んで一体化させた。

### 2.3 室内促進試験項目

#### (1) 促進中性化試験

供試体の作製詳細と試験材齢は表-3 に示す通りである。積層ブロックから採取した試験体は、温度 20℃湿度 99%RH の高湿室で 3 日間養生した後、温度 20℃湿度 60%RH の低湿室に移して 4 週間静置した。その後、試験面以外のすべての面をアルミニウム箔で密封し、JIS A1153 : 2012 に準拠して、温度 20℃±2℃、湿度 60±5% RH、二酸化炭素濃度 5±0.2% の条件で促進試験を実施した。所定の材齢にて促進面と垂直した面で試験体を割裂し、割裂面でフェノールフタレイン溶液を噴霧して、同基準に従って供試体ごとに 10 点の中性化深さを測定した。また、比較検討するため、鋼製型枠に突き固めて供試体を作製し、同様な試験を実施した。

#### (2) 塩分浸漬試験

塩分浸漬状況を EPMA 面分析によって実施するため、積層ブロックから採取したコアを成形して浸漬を実施し、その後供試体を切出して EPMA 面分析に使用した。図-4 に供試体作製の一例を示している。コアを採取した後、促進中性化試験体と同じように 3 日間高湿養生、4 週間低湿養生を行った。低湿養生期間中において、JSCE-G 572-2018 に準拠して、コアの両端面から各 25mm を切断して φ100×150mm の円柱体を成形し、コア採取方向の 1 面のみを残し、他の面をすべてエポキシ樹脂で被覆した。低湿養生が終了後、あらかじめ温度 20±2℃ の水中で 24 時間静置した後、温度 20±2℃、濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液中で浸漬した。浸漬期間 27 週と 52 週でコアを一本ずつ取り出し、図-4 のように浸漬面の中央付近で EPMA 試験用供試体を切り出した。供試体は、積層痕境を複数観察できるように幅を 50mm とし、塩分浸透深さ方向を 40mm とした。

EPMA 面分析では、試料に照射する電子線の直径を 100μm とし、上記 50×40mm の試料面をステージスキャン法により 100μm 間隔で動かすことで 500×400 箇所(以下、ピクセルと記す) の面分析を行った。各ピクセルの目的元素の量は、特性 X 線の強度をカウント数で表し、カウント数から濃度への一般的な変化は、目的元素の濃度が既知の標準試料で予め作成した検量線を用いて行った。本研究では、塩水浸漬面を開始点とし、塩分浸透深さ方向に沿って同一深さで得られた 500 ピクセルの塩素の平均値を求め、塩素の濃度プロファイルを作成した。

### 2.4 屋外暴露試験項目

橋脚と梁は、製作してから約 1 年間屋内で静置させた後、神奈川県横浜市の敷地内で屋外暴露試験を開始した。橋脚は実用時を想定して立てて設置し、図-5 に示す「暴露前」箇所を北西方向に向けて暴露した。梁については、

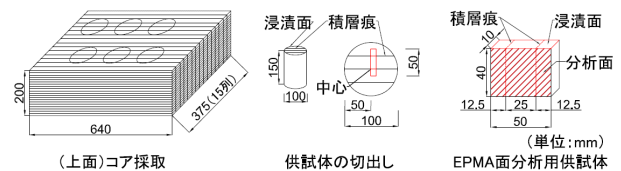


図-4 塩分浸透試験における供試体作製の一例

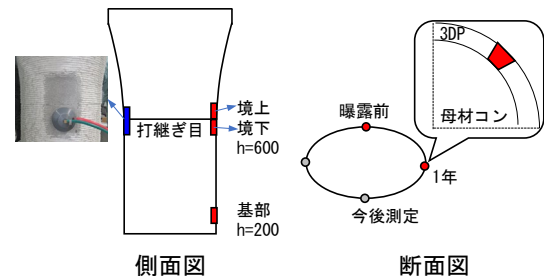


図-5 橋脚埋設型枠の耐久性試験箇所

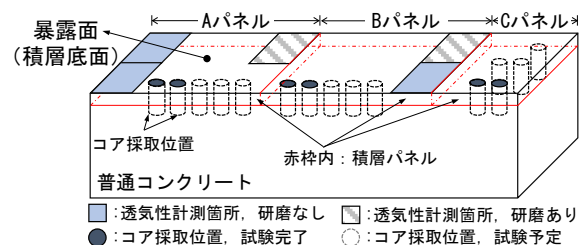


図-6 梁の暴露方向および耐久性試験箇所

積層パネルを梁の下部型枠として製作した(図-3)が、暴露時には製作時と上下逆転して設置し、図-6 に示すように積層パネルが直接雨水が当たるようにした。なお、屋外暴露前と暴露 1 年後に下記の各試験を実施した。

#### (1) 中性化深さ

橋脚の埋設型枠について、高さ方向積層の均質性や打継ぎ目の影響を検討するため、図-5 に示す基部、打継ぎ目上部と下部の 3 箇所でも評価を行った。この 3 箇所においてそれぞれグラインダーによって高さ 100mm(10 層相当)、幅 100mm、深さ 50mm(2 列相当)程度の範囲を切削し、切断面で中性化深さを測定した。

梁におけるコアの採取箇所を図-6 に示す。暴露面から内部コンクリートに向かって φ50×h100mm のコアを採取し、割裂してから中性化深さを調べた。

#### (2) 表層透気試験

積層体の表層透気試験はトレント法によって行った。橋脚の計測状況を図-5 に示し、打継ぎ目の上下各 150×150mm 範囲内の不陸を研磨して試験を実施した。梁の計測面は、図-6 に示すように平板上に積層した際の積層底面であるため、ほぼ平坦であった。しかし、隣り合う列の間に積層境が顕在したところが多数確認された。その影響を確認するため、図示のように研磨あり・なしの計 5 箇所でも試験を実施した。また、四電極法によるコン

クリートの電気抵抗率試験方法(案)(JSCE-G 581-2018)のB法を参考に4点WENNERプローブ方式電気抵抗計によって同じ箇所での電気抵抗率を計測した。

### (3) 細孔径分布試験

細孔径分布試験には、橋脚の中性化深さ確認用に異なる位置で切り出した試料を使用した。測定範囲 300~0.003 $\mu\text{m}$  の水銀圧入式ポロシメータを用いて試験を実施した。試料は 24 時間以上アセトンに浸漬して水和停止し、アスピレーターで乾燥させて 5mm 角の粒状に切断加工した。その後 1 週間凍結真空乾燥機で乾燥させポロシメータ分析を行った。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 室内促進試験

#### (1) 促進中性化

コンクリートの中性化進行速度の評価は、式(1)に示す $\sqrt{t}$ 則が良く用いられる。

$$y = b\sqrt{t} \quad \text{式(1)}$$

ここに、 $y$ は中性化深さ(mm)、 $t$ は促進時間(年)、 $b$ は中性化速度係数( $\text{mm}/\sqrt{t}$ )を示す。

中性化深さの平均値を $\sqrt{t}$ で整理した結果を図-7に示す。同図にはそれぞれの回帰直線および中性化速度係数を合わせて示す。プリント製作した積層体(P)は、突き固め製作した供試体(C)より中性化速度係数が小さく、さらに促進させる方向によって明らかな差異が見られる。

促進 26 週後の中性化状況は写真-1に示す。突き固め供試体はほぼ均等に中性化していることに対して、積層体では中性化深さが不均一である箇所が散見される。積層体の上下面から促進した場合、積層の列と列の境目で一部中性化が進む様子がみられるが、積層体の左右面から促進した場合は中性化深さが非常に小さくなっていた。突き固め製作の場合、鋼製型枠をたたいて試料を充填させるのに対し、プリント製作の場合、ノズルの押出作用によって試料がより密になった可能性がある。さらに層間は、積層時の上部自重によって圧密され密着度が高くなったために積層体の左右面はより緻密になったと考え

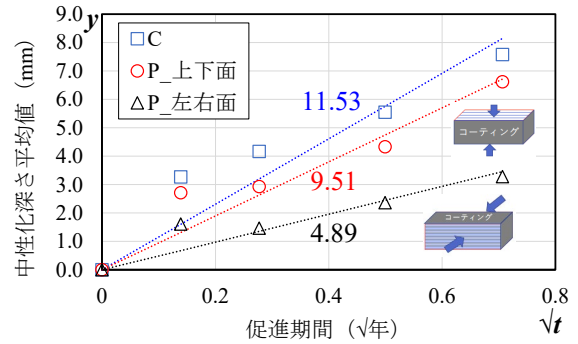


図-7 促進中性化の計測結果

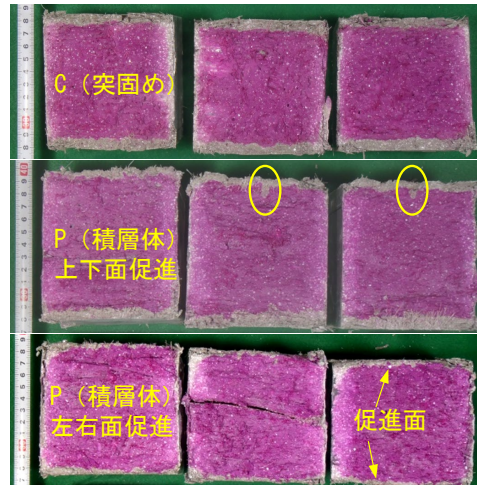


写真-1 促進期間 26 週後の中性化状況

られる。

なお、中性化深さのバラツキを評価するため、図-7に示している各平均値に対する変動係数を求めた。その結果、各材齢の変動係数を平均すると、突き固め供試体の値は0.12であったが、上下面および左右面促進した積層体の場合はそれぞれ0.37と0.32であって突き固め供試体の約3倍の値となった。この中性化深さの変動は、積層境で局所的な浸透や表面の凹凸による測定結果のばらつきに起因したと思われる。

#### (2) 塩分浸漬試験

浸漬期間 52 週での塩化物イオン浸透状況の結果を写真-2に示す。また、浸漬期間 27 週と 52 週の塩化物イ

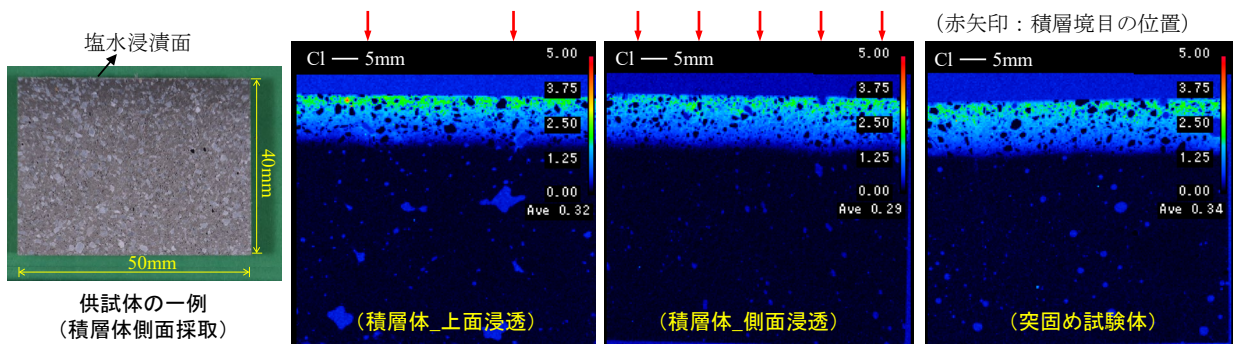


写真-2 塩化物イオン浸透状況(浸漬期間: 52 週)

オン濃度分布を図-8 に示す。同じ浸漬期間の場合、積層体における浸透方向の違いや積層体と突き固め供試体の比較でも、浸透深さと濃度勾配についていずれも有意な差異が認められなかった。同配合で同様に製作した積層ブロックから採取したコアを用いた強度試験では、力学特性に異方性があることを確認しているが<sup>8)</sup>、塩化物イオンの浸透が積層境目で進む傾向はみられなかった。3Dプリンタによって製作した積層体は、突き固め作製方法と同等な塩分浸透抵抗性を有しており、面状に均等に浸透している。

図-8 によると、浸漬期間 27 週と 52 週の塩分浸透深さの平均値はそれぞれに 7.9mm と 9.1mm であり、浸漬期間が約 2 倍になったにも関わらず 1mm 程度しか増加せず停滞している。一方で、塩化物イオン濃度については、浸漬面付近において 27 週から 52 週にかけて 0.64% から 1.39% に増加し、これに応じて濃度勾配も大きくなることが見受けられる。

### 3.2 屋外暴露試験

#### (1) 中性化深さ

図-9 に屋外暴露前後の中性化深さの平均値を示す。同図の上部には、積層体における計測位置を示しており、それぞれ最も中性化しにくいと思われる積層体断面（幅 25mm×厚 10mm）の幾何中心、および中性化が進行しやすいと思われる層間や列間で計測を行った。ここで、断面幾何中心を積層中央、層間や列間を積層境と呼ぶ。橋脚の埋設型枠は、暴露しても中性化の進行がほぼ観察されなかった。ただし、グラインダーの切削によって中性化していない部分のアルカリが全断面に付着した可能性があることも考えられたことから、採取した試料を割裂して積層境の中性化深さについても調べた。その結果、上述結果と同様、積層中央での中性化が見られず、積層境においても最も深い箇所でも 2mm 程度（写真-3(a)）であった。

梁の埋設型枠の中性化程度は、図-9 に示すように暴露前後や積層箇所によって大きな差異があった。屋内に約 1 年間静置した後の、積層中央と積層境での中性化深さの平均値はそれぞれ 2.0mm と 4.6mm であったが、屋外暴露 1 年後には 6.4mm と 8.2mm になり、いずれも中性化が 4mm 程度進行した。写真-3(b) は梁埋設型枠の積層境での中性化状況の一例である。

ここで、橋脚と梁はそれぞれ積層体の側面と底面が暴露面である。これらの結果は、前節で述べた室内促進試験と同様、積層体の層間は密着度が高いが、隣り合う列の間では物質移動が生じやすいためであると考えられる。

#### (2) 表層透気係数

暴露前後の表層透気係数と電気抵抗率の計測結果を図-10 に示す。暴露前後の電気抵抗率は 100kΩcm 程度

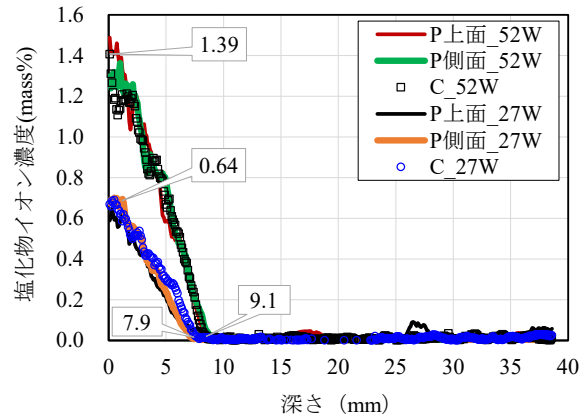


図-8 塩分浸透方向での濃度分布

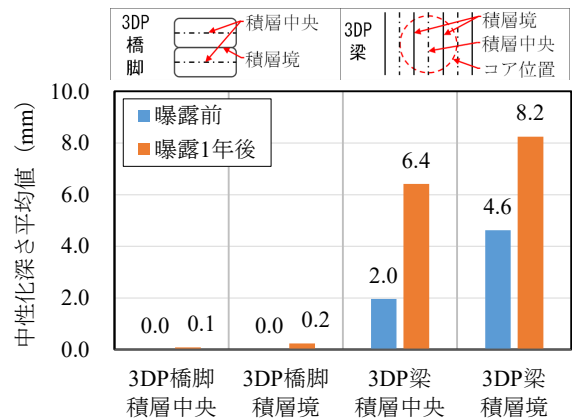


図-9 屋外暴露前後の中性化深さ



(a) 橋脚積層境 (b) 梁積層境  
写真-3 屋外暴露 1 年後の中性化深さ状況

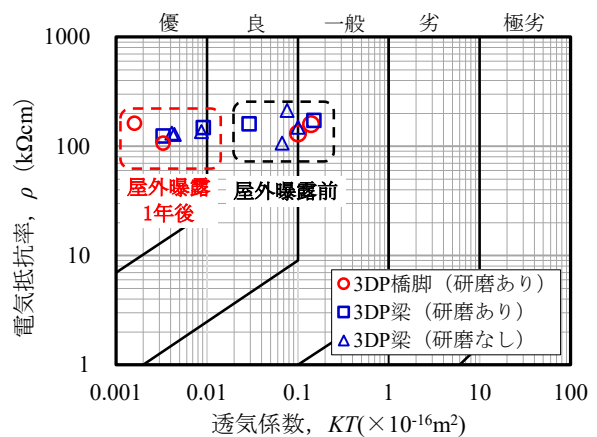


図-10 表層透気係数の測定結果

であり、ほぼ同様な範囲に位置している。また、屋外暴露前の表層透気係数は「良」あるいは「一般」の範囲内

にあったが、暴露1年後にすべて「優」の領域に入っており、表層品質が明らかに向上した。このことは、暴露期間中の降水によって水分が補給され、水和反応によって内部の細孔構造が緻密化されたためと推測される。

### 3.4 細孔容積分布の結果

橋脚の埋設型枠の細孔構造の変化を確認するため、図-11のように細孔容積分布を測定した。ここでは、主に毛細管空隙およびゲル空隙である2000nm以下の空隙に着目し、屋外暴露により変化が生じていないか確認を行う。同図より、屋外暴露前の試料は、供試体採取箇所にかかわらず二つのピークが現れ、それぞれ100nm付近と10~30nm範囲内であった。暴露1年後では、いずれも小径側へシフトする傾向がみられた。暴露期間中の降水の影響により水和反応が進んだのではないかと考えられる。屋外暴露試験については、今後も継続し、定期的に分析を行う予定である。

### 4. まとめ

本研究の範囲内において得た知見を以下にまとめる。

(1) 促進中性化試験では、積層体の上下面と左右面において中性化の進行に異方性が認められたが、突き固め作製した供試体に比べて中性化に対する抵抗性が高い傾向がみられた。また、屋外暴露した埋設型枠として使用した積層体においても中性化の進行に異方性が見られた。

(2) 積層製作した試験体は、突き固め作製と同等な塩分浸透抵抗性を有しており、浸漬期間の増加に伴う浸透深さの増加は僅かであった。

(3) 埋設型枠として用いた積層体は、暴露1年後に表層透気係数が向上し「優」の評価結果となった。また、細孔構造について、2000nm以下の細孔が小径側にシフトする傾向がみられた。これは、暴露期間中の降水による水分補給により水和反応が進んだためと推測された。

### 謝辞

本稿の試験体作製にあたり、太平洋セメント（株）より材料を提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：3Dプリンティングによるコンクリート構造物構築に関する研究委員会報告書，2021。
- 2) J. Xiao, et al.: Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities, *Cement and Concrete Composites*, Vol.122, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104115>

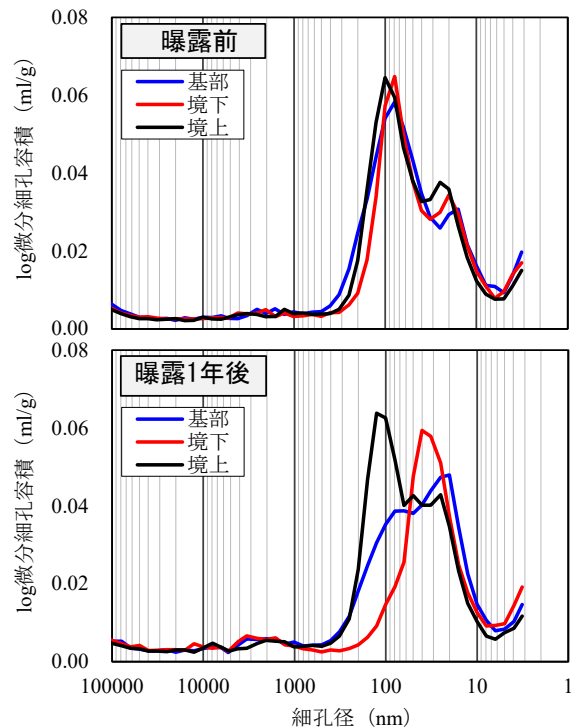


図-11 水銀圧入法による細孔径分布の結果  
(上図：暴露前，下図：暴露1年後)

- 3) K. Kinomura, et al.: Application of 3D printed segments designed by topology optimization analysis to a practical scale prestressed pedestrian bridge, *Proc. of 2nd Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication -Digital Concrete 2020-*, RILEM book series vol.28, pp.658-668, 2020.7
- 4) 木ノ村幸士，張文博，川端康平，河村圭亮：3Dプリンティングで外殻を構築したデモ橋脚の交番載荷試験による性能評価，*コンクリート工学年次論文集*，Vol.44, No.1, pp.1528-1533, 2022。
- 5) Babafemi, A.J., et al.: A concise review on interlayer bond strength in 3D concrete printing, *Sustainability*, Vol.13, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13137137>
- 6) 前堀伸平，黒澤真一，小川洋二，張文博：3Dプリンティングに適した短繊維補強モルタルの配合および押出性に関する実験的検討，*コンクリート工学年次論文集*，Vol.43, No.1, pp.1373-1378, 2021。
- 7) 河村圭亮，川端康平，白井達哉，ほか：3Dプリンティングで製作した埋設型枠を有するRC梁部材の曲げ挙動に関する実験的検討，*土木学会全国大会第77回年次学術講演会*，V-260, 2022
- 8) 鈴木三馨，白井達哉，木ノ村幸士，小川洋二：3Dプリンティングで製作した埋設型枠の強度特性，*コンクリート工学年次論文集*，Vol.43, No.1, pp.1385-1390, 2021。